بررسی تأثیر استفاده از پوزولان‌های میکروسیلیس، متاکائولن و زئولیت و الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت در برابر نفوذ یون کلر در بتن در شرایط محیطی جزیره قشم*

محمد شکرچی‌زاده[۱] مهدی ولی‌پور[۲] فرهاد پرگر[۳]

چکیده *امروزه کاهش عمر مفید، هزینه‌های تعمیر و بازسازی سازه‌های بتنی آسیب دیده در اثر خوردگی و دیگر عوامل مخرب در مناطق خورنده مانند سواحل خلیج فارس صدمات جبران‌ناپذیری بر اقتصاد کشور و توسعه‌ی پایدار در این مناطق وارد کرده است. بنابراین لزوم بررسی و شناخت رفتار بتن در چنین مناطقی برای افزایش عمر مفید سازه‌های بتنی و جلوگیری از تخریب زودرس آن ها ضروری می‌باشد. بدیهی است که از جمله مهم ترین عوامل تخریب چنین سازه‌هایی، نفوذ یون کلر و خوردگی ناشی از آن می‌باشد. یکی از راه‌های نفوذناپذیری بتن استفاده از پوزولان‌های مختلف برای بهبود ریزساختار بتن است. در این تحقیق، عملکرد سه پوزولان میکروسیلیس (۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد جایگزینی)، متاکائولن (۵،۱۰ و ۱۵ درصد جایگزینی) و زئولیت (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزینی) و الیاف پلی‌پروپیلن به منظور افزایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلر مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج، نشان دهنده‌ی عملکرد مثبت آزمونه‌های حاوی پوزولان در مقایسه با بتن بدون پوزولان است.*

واژه‌های کلیدی پایایی بتن، نفوذ یون کلر، میکروسیلیس، متاکائولن، زئولیت.

Effect of Silica Fume, Metakaolin, Zeolite and Polypropylene Fiber on Chloride Diffusion in Concrete

M. Shekarchizadeh M. Valipour F. Pargar

Abstract *Rapid concrete deterioration in Persian Gulf region has become one of the major concerns since it shortens the structure life span and increases the maintenance costs. The main cause of such concrete failure is claimed to be chloride permeation and subsequent corrosion. Pozzalns are widely being used in order to construct more durable concrete as a functional solution to this problem. The paper reports the performance of concrete incorporating silica fume (replacement level of 5%, 7.5% and 10%), metakaolin (replacement level of 5%, 10% and 15%), zeolite (replacement level of 10%, 20% and 30%) and Polypropylene Fiber in the binder to resist the chloride penetration in aggressive environments. The results showed that specimens containing pozzolans function better than control concretes.*

Key Words Concrete Durability, Chloride Penetration, Silica Fume, Metakaolin, Zeolite

---

*نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۹/۱/۲۲ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۹/٤/۲۲ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) دانشیار، دانشکده‌ی مهندسی عمران و سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه تهران

(۲) نویسنده‌ی مسئول، دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه تهران

(۳) کارشناس ارشد، انستیتو مصالح ساختمانی، دانشکده‌ی فنی، دانشگاه تهران

مقدمه

در سال‌های اخیر، مشکلات ایجاد شده برای سازه‌های بتنی در مناطق گزندبار دنیا از جمله خلیج فارس موجب شده تا بحث پایایی بتن در چنین مناطقی اهمیت خاصی پیدا کند؛ به طوری که امروزه پایایی بتن در طراحی و ساخت سازه‌های زیربنایی هر کشوری از اصلی‌ترین عوامل می‌باشد. کاهش نسبت آب به سیمان و استفاده از پوزولان‌های مختلف از جمله روش‌های مهم به منظور بهبود پایایی بتن است. پوزولان‌های مورد استفاده در کشور ما اغلب میکروسیلیس و تا حدودی متاکائولن و اخیراً نیز پوزولان طبیعی زئولیت می‌باشد. میکروسیلیس یک سوپر پوزولان با مشخصاتی است که اکثر مهندسین با آن آشنایی دارند. متاکائولن نیز یک پوزولان بسیار فعال است. مواد خام اولیه در تولید متاکائولن، رس کائولن می‌باشد. کائولن، یک ماده‌ی معدنی بسیار ریز سفید و رسی است که در دماهای ۱۰۰ و ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، این مواد رسی بیشتر آب جذب شده خود را از دست می‌دهند. دمایی که در آن کائولینیت که اصلی‌ترین جز تشکیل دهنده ی کائولن، به واسطه دی هیدراکسیونیزاسیون آب از دست می‌دهد، بین ۵۰۰ الی ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد می‌باشد. به منظور تولید متاکائولن رس کائولن را تا محدوده دمای ۷۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی گراد حرارت می‌دهند [1]. متاکائولن موجب ارتقاء خواص مکانیکی بتن در کوتاه‌مدت و درازمدت می‌شود. استفاده از متاکائولن ریز ساختار، مقاومت فشاری بتن و مقاومت در برابر نفوذ یون کلر آن را بهبود می‌بخشد [۲].

Boddy و همکاران (۲۰۰۱) و همچنین Gruber و همکاران (۲۰۰۱) نفوذ یون کلر را در ۳٦۵ و ۱۰۹۵ روز پس از رویارویی اندازه‌گیری کردند. نتایج، نشان می‌دهند که با کاهش نسبت آب به سیمان و با افزایش درصد جایگزینی متاکائولن، میزان نفوذ یون کلر کاهش می‌یابد [3,4].

زئولیت نیز یک کانی متبلور با ترکیبی از سیلیکات آلومینیم هیدراته از عناصر قلیائی و قلیائی-خاکی می‌باشد. خواص پوزولانی زئولیت‌ها به علت وجود اکسیدهای سیلسیم و آلومینیم در ترکیب شیمیایی آن‌ها است. تحقیقات متعدد نشان می‌دهد که زئولیت خواص پوزولانی قابل توجهی دارد. همچنین باید اشاره نمود که زئولیت، دارای ساختار داخلی خاصی به صورت شبکه‌ی کریستالی سه بعدی است و سطح داخلی آن بسیار زیاد است و به این دلیل دو ویژگی تبادل یونی (ion exchange) و جذب سطحی (surface absorption) در این ماده پوزولانی بسیار شاخص است [5-10]. نتایج تحقیقی که توسط Tatematsu و همکاران در سال ۱۹۹٦ انجام گرفت، نشان دهنده ی توقف واکنش‌های آلکالینی سنگدانه‌ها و کاهش خوردگی میل‌گرد در بتن در سیمان‌های حاوی زئولیت است که موجب جلوگیری از تخریب سازه‌های بتنی می‌شود [11]. تحقیق جامعی که توسط Ahmadi و Shekarchi در مورد کاربرد زئولیت در بتن در مقایسه با پوزولان‌های میکروسیلیس و خاکستر بادی در سال ۲۰۰۹ انجام شده، نشان داد که بتن حاوی ۲۰ درصد جایگزینی زئولیت موجب کاهش جذب آب و ضریب انتشارپذیری یون کلر می‌شود. همچنین نفوذپذیری گاز بتن‌های با جایگزینی ۱۰ درصد زئولیت کاهش می‌یابد [12]. محققین دیگر نیز نشان دادند که زئولیت در زمینه‌ی انتشار یون کلر، ضعیف‌تر از میکروسیلیس و بهتر از خاکستربادی عمل می‌کند [13]. بنابراین از مجموع مطالب ارائه شده می‌توان انتظار داشت که هر سه پوزولان میکروسیلیس، متاکائولن و زئولیت در راستای بهبود ریز ساختار و نفوذ ناپذیری و در نتیجه دوام بتن در مناطق خورنده، عملکرد مثبتی داشته باشند.

در همین راستا، انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران در سال ۱۳۸٦ با حمایت سازمان منطقه‌ی آزاد قشم

اقدام به احداث دومین سایت تحقیقات پایایی بتن در جزیره‌ی قشم نمود. دارا بودن یکی از بزرگ‌ترین مناطق آزاد کشور، لزوم توسعه‌ی سرمایه‌گذاری و گسترش سازه‌های زیربنایی و هم‌چنین واقع شدن در منطقه‌ی خلیج فارس بعنوان مهاجم‌ترین محیط دریایی از جمله دلایل انتخاب این جزیره به منظور اجرای این طرح تحقیقاتی است. در این تحقیق، آهنگ نفوذ یون کلر با ساختن آزمونه‌های بتنی حاوی پوزولان‌های میکروسیلیس(۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد جایگزینی)، متاکائولن(۱۰،۵ و ۱۵ درصد جایگزینی) و زئولیت(۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزینی) و الیاف پلی‌پروپیلن با استفاده از مصالح محلی و در شرایط رویارویی محیطی جزرومد و پاشش که از بحرانی‌ترین نواحی قرارگیری بتن می‌باشند [14,15]، بررسی و نتایج حاصل با بتن شاهد مقایسه شده است.

ساخت آزمونه‌ها

ساخت آزمونه‌های بتنی با استفاده از سیمان پرتلند تیپ دو کارخانه سیمان هرمزگان و مصالح سنگی تهیه شده از منطقه انجام پذیرفت. آنالیز شیمیایی پوزولان‌های مصرفی در جدول (۱) و مشخصات طرح‌های اختلاط در جدول (۲) ارائه شده است. در کلیه طرح‌های اختلاط نسبت آب به مواد سیمانی ۰/٤، مقدار آب ۱٦۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مصالح سنگی ریزدانه به صورت گردگوشه و سیلیسی- آهکی می‌باشند. هم چنین مجموع سنگدانه‌ها به طور تقریبی ۱۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و بزرگترین اندازه‌ی سنگدانه‌ی مورد استفاده، ۱۹ میلی‌متر می‌باشد. قابل ذکر است که به منظور تامین روانی بتن تازه از مواد فوق روان کننده با پایه کربوکسیلات استفاده شده است. همان‌طور که در جدول (۲) مشاهده می‌شود، در طرح‌های اختلاط حاوی زئولیت مقدار فوق روان کننده مورد نیاز برای رسیدن به روانی مورد نظر از سایر مواد پوزولانی بیشتر است. دلیل اصلی این موضوع، خاصیت جذب سطحی بسیار شدید در زئولیت است. در عین حال، مطالعات دیگری که انجام شده، نشان می‌دهد در صورت انتخاب فوق‌روان‌کننده متناسب با پایه‌ی متفاوت می‌توان مقدار افزودنی شیمیایی را کاهش داد.

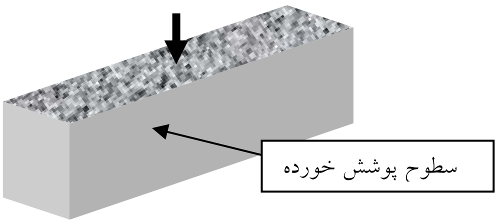
برای اندازه‌گیری یون کلر، آزمونه‌های منشوری ٦۰×۱۵×۱۵ سانتی‌متری ساخته شده و به مدت سه روز تحت شرایط محیطی منطقه‌ی عمل‌آوری، مرطوب شدند. پس از عمل‌آوری، مطابق استاندارد ASTM G109، سطوح جانبی و فوقانی آزمونه‌ها با پوشش سطحی با پایه پلی‌اورتان که در برابر شرایط حاد جنوب بسیار مقاوم است، پوشانده شده تا فقط سطح تحتانی بتن قالب‌گیری شده در معرض نفوذ یون کلر قرار گیرد (شکل (۱)) [16]. آزمونه‌های منشوری در اردیبهشت ماه ۱۳۸۷ در دو شرایط رویارویی جزرومد و پاشش در جزیره قشم قرار داده شدند (شکل (۲)).

جدول ۱ آنالیز شیمیایی سیمان و پوزولان‌های مورد مصرف

عنوان	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	L.O.I
سیمان	۲۱	۵	۳/۵	٦۳	۱/۸	۱/٦	۰/۵	۰/٦	۲
میکروسیلیس	۹۳/۱٦	۱/۱۳	۰/۷۲	_	۱/٦	۰/۰۵	_	_	۱/۵۸
متاکائولن	۵۱/۸۵	٤۳/۸۷	۰/۹۹	۰/۲	۰/۱۸	_	۰/۰۱	۰/۱۲	۰/۵۷
زئولیت	٦۷/۷۹	۱۳/٦٦	۱/٤٤	۱/٦۸	۱/۲	۰/۵	۲/۰٤	۱/٤۲	۱۰/۳۲

جدول ۲ مشخصات نسبت‌های اختلاط

کد آزمونه	عیار مواد سیمانی (kg/m^3)	پوزولان جایگزین (kg/m^3)	مقدار الیاف (kg/m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)	اسلامپ (cm)
C2	٤۰۰	–	–	۰/۲	۷
SF5	۳۸۰	۲۰	–	۱/۲	٦
SF7.5	۳۷۰	۳۰	–	۱/٤	۵
SF10	۳٦۰	٤۰	–	۱/٦	۸
MK5	۳۸۰	۲۰	–	۰/۸	۵
MK10	۳٦۰	٤۰	–	۱/٤	۵/۵
MK15	۳٤۰	٦۰	–	۱/٦	۸
ZE10	۳٦۰	٤۰	–	٤	٦
ZE20	۳۲۰	۸۰	–	۸	۸
ZE30	۲۸۰	۱۲۰	–	۱٤	٦
SF10P0	۳٦۰	٤۰	۰/۹	۱٦	۷
SF10P1	۳٦۰	٤۰	۱/۸	۷	۱۰



شکل ۱ شمای آزمونه‌های منشوری پس از اجرای پوشش



شکل ۲ آزمونه‌های منشوری واقع در ناحیه‌ی جزرو مد

تعیین میزان نفوذ یون کلر

پس از نه ماه از آغاز زمان رویارویی، اولین مرحله عملیات پودرگیری برای تعیین میزان نفوذ یون کلر در محل سایت انجام شد. برای این منظور، دستگاه پروفیل‌گیری و گیره‌ی نگهداری متناسب با آزمونه‌های منشوری، طراحی و ساخته شد (شکل (۳)). پودرهای تهیه شده به آزمایشگاه انستیتو مصالح ساختمانی منتقل و مطابق استاندارد ASTM C114 [17] عملیات محلول‌سازی انجام و سپس با استفاده از روش اسپکتوفتومتری، مقدار یون کلر مشخص شد. نتایج حاصله توسط نرم‌افزارهای مربوطه تجزیه و تحلیل و مقادیر ضریب انتشارپذیری و کلر سطحی با استفاده از برازش معادله‌ی دوم فیک به‌دست آمد [۱۸].

نتایج و بحث

مقاومت فشاری بتن سخت شده. مقاومت فشاری آزمونه‌ها با ساخت آزمونه‌های مکعبی ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متری اندازه‌گیری شد. نتایج مربوط به متوسط مقاومت فشاری سه آزمونه‌ی بتنی در سنین ۷ و ۲۸ روز در جدول (۳) ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج مشاهده می‌شود، در سن ۷ روزه تمامی آزمونه‌های حاوی پوزولان به‌جز آزمونه‌های ZE20 و ZE30 نسبت به آزمونه شاهد افزایش مقاومت داشته‌اند که بیشترین این مقدار، مربوط به آزمونه SF10P0 با ٦٢ درصد افزایش نسبت به آزمونه شاهد می‌باشد. جالب توجه این‌که آزمونه‌های ZE20 و ZE30 به ترتیب با ٦ و ١٩ درصد کاهش، مقاومت کم‌تری نسبت به آزمونه شاهد داشته‌اند. در سن ۲۸ روزه نیز کلیه‌ی آزمونه‌های حاوی پوزولان به‌جز آزمونه ی ZE30 نسبت به آزمونه شاهد افزایش مقاومت داشته‌اند؛ به طوری که آزمونه SF10P1 با ٤٩ درصد افزایش نسبت به آزمونه شاهد بیشترین افزایش مقاومت را دارد؛درحالی‌که آزمونه‌ی ZE30 در این سن نسبت به آزمونه شاهد ۱۵ درصد کاهش مقاومت را نشان داده است. در نتیجه آزمونه‌های حاوی میکروسیلیس در ترکیب با الیاف پلی‌پروپیلن بهترین عملکرد و آزمونه‌های حاوی زئولیت با درصد جایگزینی بیشتر از ۱۰٪، ضعیف‌ترین عملکرد را از لحاظ بهبود مقاومت فشاری داشته‌اند. این در حالی است که مقاومت فشاری آزمونه‌ی ZE10 ، بیش از مقاومت فشاری آزمونه‌های SF5 و MK5 است.





شکل ۳ جزئیات عملیات پودرگیری از آزمونه‌ها در محل سایت تحقیقاتی

جدول ۳ مقاومت فشاری آزمونه‌های حاوی پوزولان و آزمونه شاهد در سنین ۷و ۲۸ روزه

کد آزمونه	مقاومت فشاری ۷ روزه	درصد افزایش نسبت به شاهد	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	درصد افزایش نسبت به نمونه شاهد
C2	۲۷	شاهد	۳۸	شاهد
SF5	۳٤	۱۲٤	٤۵	۱۲۰
SF7.5	٤۱	۱۵۲	۵۰	۱۳۳
SF10	۳۸	۱٤۰	۵۲	۱۳۹
MK5	۳۲	۱۱۷	٤۳	۱۱۵
MK10	۳٦	۱۳۳	٤۵	۱۱۹
MK15	۳۹	۱٤۲	٤۷	۱۲۵
ZE10	۳۸	۱٤۰	٤۷	۱۲۵
ZE20	۲٦	۹٤	٤۰	۱۰٦
ZE30	۲۲	۸۱	۳۲	۸۵
SF10P0	٤٤	۱٦۲	۵٤	۱٤۵
SF10P1	٤۳	۱۵۸	۵٦	۱٤۹

پروفیل یون کلر. پروفیل‌های یون کلر کل (محلول در اسید) حاصل از برازش مقادیر کلر در عمق‌های مختلف بتن، مربوط به آزمونه‌های حاوی پوزولان و آزمونه شاهد در ناحیه‌های جزرومد و پاشش به ترتیب در نمودارهای (۱) و(۲) ارائه شده است. لازم به ذکر است مقدار کلر بحرانی طبق تحقیقات قبلی به دست آمده از سازه‌های واقعی در منطقه‌ی خلیج فارس، ۰/۰۷ درصد وزنی بتن در نظر گرفته شده است که در نمودارهای مربوط به پروفیل آزمونه‌ها مشخص می‌باشد [19,20].

هم‌چنین از دیگر پارامترهای حاصل از تجزیه و تحلیل نتایج برازش که در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته‌اند، می‌توان به مقادیر یون کلر در عمق ۲۰ میلی‌متر، ضریب انتشارپذیری و مقادیر کلر سطحی اشاره کرد که به ترتیب در جداول (٤)، (۵) و (٦) ارائه شده‌اند. باید یادآور شد که ضریب رگرسیون (r^2) در محاسبه‌ی ضریب انتشارپذیری بیش از ۰/۹٦ بوده است.

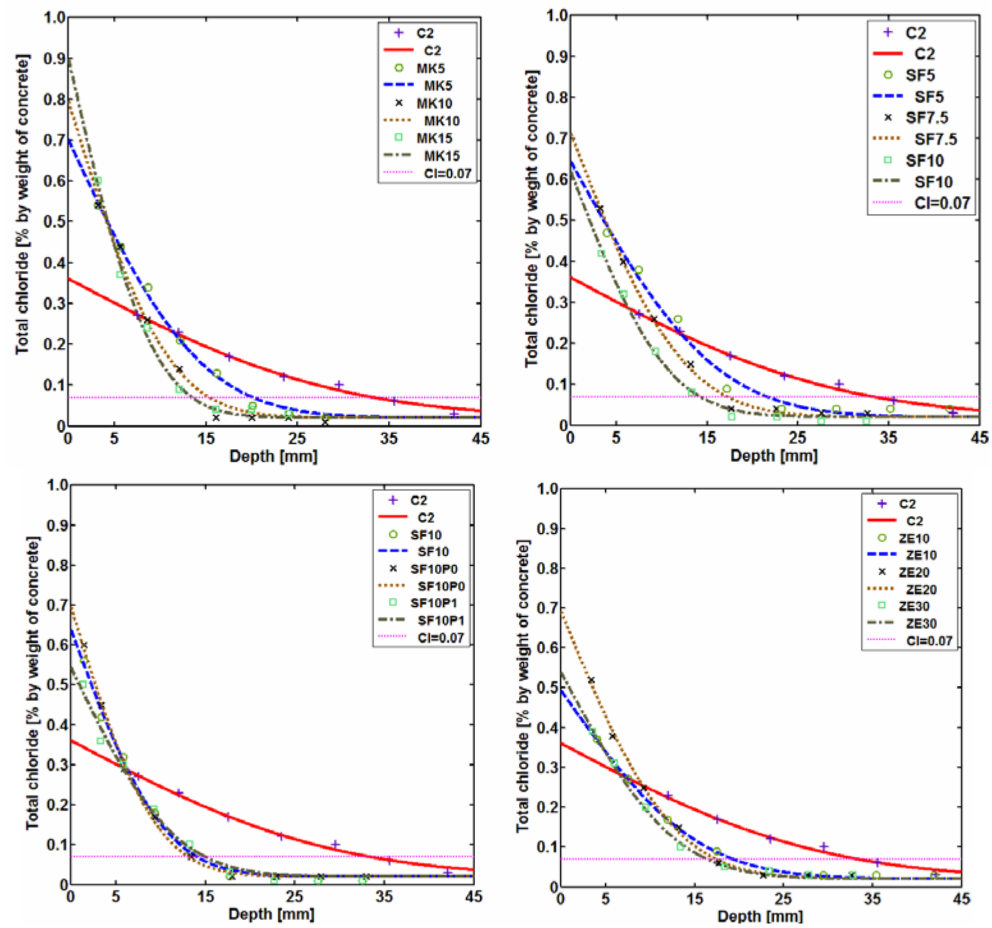
همان‌طور که از نتایج مربوط به ناحیه‌ی جزرومد برمی‌آید، در آزمونه‌های حاوی پوزولان میکروسیلیس با افزایش میزان درصد جایگزینی میکروسیلیس، میزان نفوذ یون کلر در عمق ۲۰ میلی متر و مقدار ضریب انتشارپذیری نسبت به آزمونه شاهد (C2) به ترتیب ۲٤ و ۱۰ درصد کاهش می‌یابد. هم‌چنین مقدار کلر سطحی نیز با افزایش درصد جایگزینی کم می‌شود؛ به طوری که این مقدار از ۰/۷۵ به ۰/٦۲ کاهش یافته و میانگین سه مقدار ۰/۷ است. با توجه به کاهش نفوذ یون کلر در عمق مشخص نسبت به آزمونه شاهد در آزمونه‌های SF5، SF7.5، SF10 که به ترتیب ۵۷ و ۷۰ و ۸۱ درصد است، می‌توان نتیجه گرفت که مناسب‌ترین عملکرد مربوط به آزمونه SF10 می‌باشد. بنابراین در ناحیه‌ی جزرومد، درصد بهینه جایگزینی میکروسیلیس بین ۷/۵ تا ۱۰ درصد تخمین زده می‌شود.

آزمونه‌های حاوی متاکائولن MK5، MK10، MK15 به ترتیب ٦۰ ، ۸۳ و ۸٦ درصد کاهش نفوذ یون کلر در عمق مشخص ۲۰ میلی‌متر و ۸۰ ، ۹۰ و ۹۲ درصد کاهش در ضریب انتشارپذیری نسبت به آزمونه شاهد داشته‌اند. میزان کلر سطحی نیز به ترتیب ۰/۷۵ ، ۰/۹۲ و ۱/۰۷ درصد وزنی بتن می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با بررسی پارامترهای نفوذ یون کلر در عمق مشخص و ضریب انتشارپذیری، عملکرد آزمونه‌های حاوی متاکائولن بهتر از آزمونه‌ی شاهد بوده، ولی میزان کلر سطحی آن‌ها بیشتر از آزمونه شاهد است. بنابراین با در نظر گرفتن هر سه پارامتر مذکور، می‌توان درصد

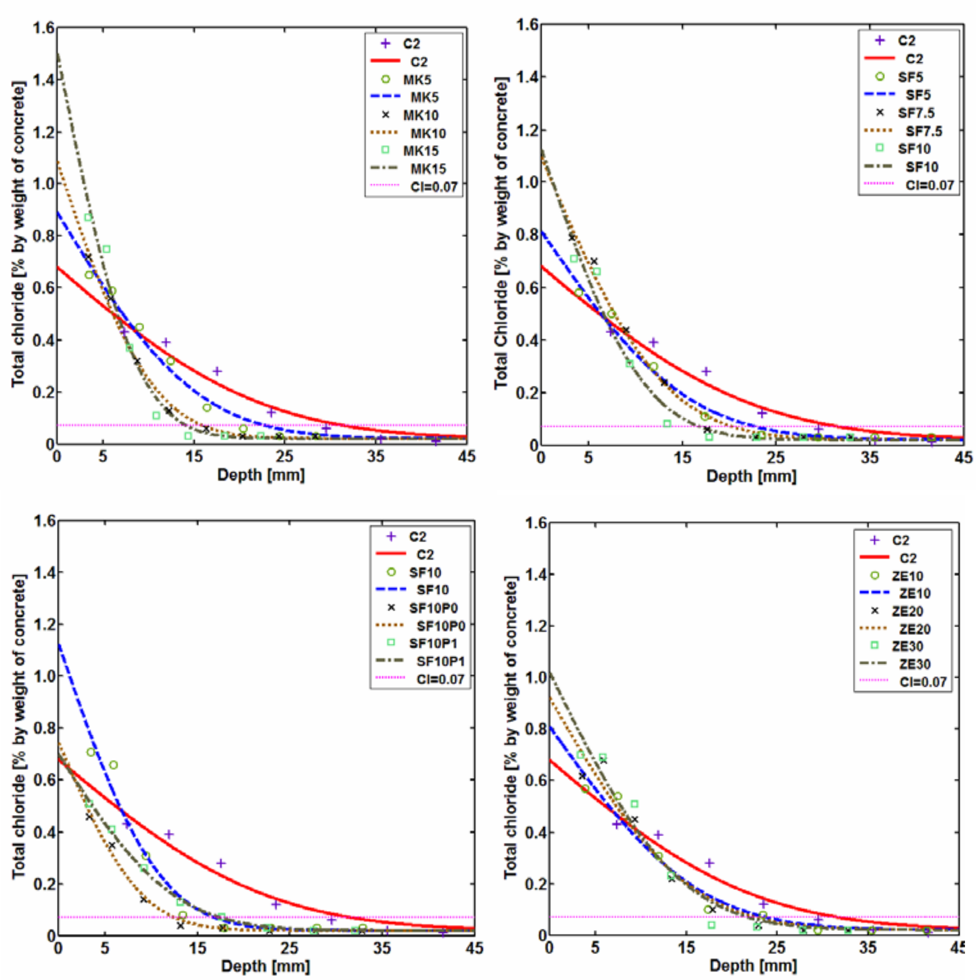
بهینه‌ی جایگزینی متاکائولن را بین ۵ تا ۱۰ درصد وزنی بتن در نظر گرفت.

در ناحیه‌ی جزرومد، مقادیر کاهش نفوذ یون کلر در عمق مشخص و ضریب انتشارپذیری آزمونه‌های حاوی زئولیت مقادیر تقریباً یکسانی را نشان می‌دهند. البته میزان کلر سطحی در این آزمونه‌ها بیشتر از آزمونه شاهد است و آزمونه ZE20 بیشترین میزان در بین آزمونه‌های حاوی زئولیت را دارا می‌باشد. مقدار کاهش کلر در عمق ۲۰ میلی‌متر بین ٤٨ تا ٦١ درصد به دست آمده است.

مقایسه‌ی آزمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن در ترکیب با ۱۰ درصد میکروسیلیس، نشان دهنده ی عملکرد متفاوت آن‌ها نسبت به آزمونه حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس است. هرچند که هر دو آزمونه SF10P0 و SF10P1 نسبت به آزمونه شاهد عملکرد بهتری داشته‌اند. نفوذ یون کلر در آزمونه SF10P0 و در عمق مشخص ۲۰ سانتی‌متر در مقایسه با آزمونه SF10 حدود ۳ درصد کاهش نشان می‌دهد؛ در حالی که همین پارامتر در آزمونه SF10P1 حدود ۳ درصد افزایش نفوذ یون کلر را داشته است. روند این تغییرات در بررسی ضریب انتشارپذیری و کلر سطحی نیز مشاهده می‌شود؛ به طوری که آزمونه‌های فوق به ترتیب ۲ درصد کاهش و ۳ درصد افزایش را در پارامتر ضریب انتشارپذیری نشان می‌دهند. کلر سطحی آزمونه SF10P0 با مقدار ۰/٦٨ درصد وزنی بتن در مقایسه با SF10 افزایش و آزمونه SF10P1 با مقدار ۰/٥٢ درصد نسبت به وزن بتن کاهش یافته است. بنابراین آزمونه SF10P0 در مقایسه با آزمونه SF10P1، نسبت به آزمونه SF10 عملکرد مناسب‌تری داشته است.



نمودار ۱ پروفیل‌های یون کلر آزمونه‌های حاوی پوزولان در ناحیه‌ی قرارگیری جزرومد



نمودار ۲ پروفیل‌های یون کلر آزمونه‌های حاوی پوزولان در ناحیه ی قرارگیری پاشش

جدول ٤ مقادیر نفوذ یون کلر در عمق ۲۰ میلی‌متری بتن در طرح اختلاط‌های مختلف (درصد وزنی بتن)

کد آزمونه	ناحیه ی جزرومد	درصد کاهش نسبت به آزمونه شاهد	ناحیه‌ی پاشش	درصد کاهش نسبت به آزمونه شاهد
C2	۰/۱۵۱	شاهد	۰/۱۹۲	شاهد
SF5	۰/۰٦٥	٥٧	۰/۱۰۲	٤٧
SF7.5	۰/۰٤٦	۷۰	۰/۰۷٤	٦١
SF10	۰/۰۲۸	۸۱	۰/۰٤۰	۷۹
MK5	۰/۰٦۱	٦۰	۰/۱۰٥	٤٥
MK10	۰/۰۲٦	۸۳	۰/۰۳٤	۸۲
MK15	۰/۰۲۲	۸٦	۰/۰۲٤	۸۷
ZE10	۰/۰٤٦	٦۹	۰/۱۱۳	٤۱
ZE20	۰/۰٤۷	٦۹	۰/۱۰۱	٤۷
ZE30	۰/۰٤٤	۷۱	۰/۰۹۲	٥۲
SF10P0	۰/۰۲٤	۸٤	۰/۰۲۳	۸۸
SF10P1	۰/۰۳٤	۷۸	۰/۰٤۸	۷٥

جدول ۵ نتایج ضریب انتشارپذیری یون کلر در طرح اختلاط‌های مختلف (متر مربع بر ثانیه)

کد آزمونه	ناحیه ی جزرومد		ناحیه ی پاشش	
	$D \times 10^{-12}$	درصد کاهش نسبت به شاهد	$D \times 10^{-12}$	درصد کاهش نسبت به شاهد
C2	۱۱/۰۷	شاهد	٦/٦٦	شاهد
SF5	۲/۳۹	۷۸	۳/۱٦	۵۳
SF7.5	۱/۹٤	۸۲	۲/۲۰	٦۷
SF10	۱/۳۷	۸۸	۱/۵۰	۷۸
MK5	۲/۲۷	۸۰	۳/۰۸	۵٤
MK10	۱/۱٤	۹۰	۱/۳۸	۷۹
MK15	۰/۸٦	۹۲	۰/۹۵	۸٦
ZE10	۲/۱۱	۸۱	۳/٤۳	٤۸
ZE20	۲/۰۰	۸۲	۲/۹۳	۵٦
ZE30	۲/۱٤	۸۱	۲/٦۰	٦۱
SF10P0	۱/۱٤	۹۰	۱/۰۱	۸۵
SF10P1	۱/۷۰	۸۵	۲/۰۱	۷۰

جدول ٦ نتایج محاسباتی کلر سطحی آزمونه‌های بتنی در طرح اختلاط‌های مختلف (درصد وزنی بتن)

کد آزمونه	ناحیه ی جزرومد	ناحیه ی پاشش
C2	۰/۳٤	۰/٦٦
SF5	۰/۷۵	۰/۷۹
SF7.5	۰/٦۹	۱/۰۸
SF10	۰/٦۲	۱/۱۱
MK5	۰/۷۵	۰/۸۷
MK10	۰/۹۲	۱/۰۷
MK15	۱/۰۱	۱/٤۸
ZE10	۰/۵۸	۰/۷۹
ZE20	۰/٦۸	۰/۹۰
ZE30	۰/۵۱	۱/۰۰
SF10P0	۰/٦۸	۰/۷۳
SF10P1	۰/۵۲	۰/٦۸

با تحلیل نتایج، می‌توان نتیجه گرفت که در مجموع آزمونه MK15 با ۸٦ و ۹۲ درصد به ترتیب بیشترین میزان درصد کاهش در نفوذ یون کلر در عمق ۲۰ میلی‌متر و بیشترین کاهش ضریب انتشارپذیری را دارد که بدین ترتیب، بهترین عملکرد را در میان آزمونه‌های مورد آزمایش در ناحیه ی جزرومد داشته است. از طرفی، آزمونه‌های SF5 و MK5 با مقدار تقریبی ٦۰ درصد کاهش در میزان نفوذ یون کلر در عمق مشخص و مقدار تقریبی ۸۰ درصد کاهش در ضریب انتشارپذیری نسبت به آزمونه شاهد در بین آزمونه‌های حاوی پوزولان

عملکرد ضعیف‌تری داشته‌اند. هم‌چنین آزمونه MK15 با ۱/۰۱ درصد وزنی بتن کلر سطحی بیشترین و آزمونه ZE30 با ۰/۵۱ درصد وزنی بتن کم ترین میزان کلر سطحی را در بین آزمونه‌های حاوی پوزولان داشته‌اند.

نتایج مربوط به ناحیه ی پاشش، کاهش میزان نفوذ یون کلر و ضریب انتشارپذیری را با افزایش مقدار درصد جایگزینی میکروسیلیس نشان می‌دهد. درصد کاهش میزان نفوذ یون کلر و ضریب انتشارپذیری برای آزمونه‌های SF5، SF7.5، SF10 در مقایسه با آزمونه شاهد به ترتیب ٤٧، ٦١ و ۷۹ درصد و ٥٣، ٦٧ و ۷۸ درصد می‌باشد. این در حالی است که مقدار کلر سطحی در این آزمونه‌ها با افزایش درصد جایگزینی روند صعودی داشته و به ترتیب ۰/۷۹، ۱/۰۸ و ۱/۱۱ درصد وزنی بتن است. با توجه به اختلاف ١٤ درصدی در کاهش نفوذ یون کلر و ضریب انتشارپذیری بین آزمونه‌های SF5 و SF7.5 و اختلاف ۱۸ درصدی در کاهش نفوذ یون کلر و ۱۱ درصدی در کاهش ضریب انتشارپذیری در آزمونه‌های SF7.5 و SF10 و با توجه به مقادیر کلر سطحی هر سه آزمونه می‌توان به این نتیجه رسید که با تغییرات اندک رخ داده، درصد جایگزینی بهینه میکروسیلیس برای این ناحیه نیز بین ۷/۵ و ۱۰ درصد است.

در آزمونه‌های حاوی متاکائولن نیز همانند آزمونه‌های حاوی میکروسیلیس، روند کاهشی نفوذ یون کلر در عمق مشخص و ضریب انتشارپذیری و افزایش مقدار کلر سطحی نسبت به آزمونه شاهد، البته با مقادیر متفاوت تکرار شده است. درصدهای کاهش ٤٥، ۸۲ و ۸۷ برای نفوذ یون کلر در عمق مشخص و ٥٤، ۷۹ و ٨٦ برای ضریب انتشارپذیری در مقایسه با آزمونه شاهد به ترتیب در آزمونه‌های MK5، MK10 و MK15 نشان دهنده ی این روند کاهشی می‌باشد. البته مقادیر کلر سطحی ۰/۸۷، ۱/۰۷ و ١/٤٨ درصد وزنی بتن به ترتیب برای آزمونه‌های MK5، MK10 و MK15 نیز بیانگر روند صعودی نسبت به کلر سطحی آزمونه شاهد است. با توجه به اختلاف درصد کاهش قابل ملاحظه ۳۷ و ۲۵ درصدی به ترتیب برای پارامترهای مقدار نفوذ یون کلر و ضریب انتشارپذیری بین آزمونه‌های MK5 و MK10 در مقایسه با اختلاف ۵ و ۷ درصدی همین مقادیر بین آزمونه‌های MK10 و MK15، چنین استنتاج می‌شود که درصد جایگزینی بهینه برای پوزولان متاکائولن در این ناحیه بین ۵ تا ۱۰ درصد می‌باشد.

آزمونه‌های ZE10، ZE20 و ZE30 شامل ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد جایگزینی پوزولان طبیعی زئولیت به ترتیب شاهد ٤١، ٤٧ و ٥٢ درصد کاهش نفوذ یون کلر در عمق مشخص و ٤٨، ٥٦ و ٦١ درصد کاهش ضریب انتشارپذیری نسبت به آزمونه شاهد است. مقادیر کلر سطحی نیز ۰/۷۹، ۰/۹ و ۱ درصد وزنی بتن می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مطابق دو پوزولان قبلی در این ناحیه، روند افزایش درصد کاهش در نفوذ یون کلر در عمق مشخص و ضریب انتشارپذیری و هم‌چنین کاهش در مقادیر کلر سطحی با افزایش درصد جایگزینی پوزولان تکرار شده است. باید توجه داشت که در این پوزولان، اختلاف درصد کاهش بین دو درصد جایگزینی متوالی اندک می‌باشد؛ به طوری که بین آزمونه‌های ZE10 و ZE20 و آزمونه‌های ZE20 و ZE30 به ترتیب ٦ و ٥ درصد اختلاف درصد کاهش در مقدار نفوذ یون کلر و ۸ و ۵ درصد اختلاف درصد کاهش در ضریب انتشارپذیری مشاهده می‌شود. بنابراین، با بررسی همه نتایج حاصله می‌توان درصد جایگزینی بهینه برای پوزولان طبیعی زئولیت را بین ۱۰ تا ۲۰ درصد تخمین زد.

آزمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن در ترکیب با پوزولان میکروسیلیس در ناحیه‌ی پاشش، شامل کدهای SF10P0 و SF10P1 در مقایسه با آزمونه شاهد عملکرد بهتری داشته‌اند؛ به طوری که به ترتیب ۸۸ و ۷۵ ٪ در میزان نفوذ یون کلر در عمق ۲۰ سانتی متر و ۸۵ و ۷۰ ٪ در ضریب انتشارپذیری نسبت به آزمونه شاهد کاهش نشان می‌دهند. ولی در مقایسه با آزمونه SF10، عملکرد آزمونه SF10P0 بهتر از آزمونه SF10P1 بوده است.

اختلاف درصد کاهش در مقدار نفوذ یـون کلـر در عمـق ۲۰ میلی‌متری بـین آزمونـه‌هـای SF10P0 و SF10P1 بـا آزمونه SF10 به ترتیب ۹ و ٤ ٪ می‌باشد. این اختلاف در ضریب انتشارپذیری، ۷ ٪ و ۸ ٪ است که نشان دهنـده ی عملکرد بهتر بتن‌های حاوی الیاف پروپیلن نسبت به بـتن بدون الیاف می‌باشد. مقدار کلـر سـطحی نیـز در هـر دو آزمونه با مقـادیر ۰/۷۳ و ۰/٦۸ ٪ وزنـی بـتن نـسبت بـه آزمونه SF10 کـاهش یافتـه اسـت. بنـابراین در مجمـوع، چنـین اسـتنتاج مـی‌شـود کـه آزمونـه SF10P0 عملکـرد مناسب‌تری نسبت بـه آزمونـه SF10P1 داشـته اسـت و افزایش در میزان استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن الزامـاً ایـن عملکرد را بهبود نمی‌بخشد.

در نهایت، بررسی نتایج کلیه ی آزمونه‌های حـاوی پوزولان‌هـای مختلـف و هـم‌چنـین آزمونـه‌هـای بـدون پوزولان با نسبت آب به سـیمان مختلـف در ایـن ناحیـه نشان می‌دهـد کـه آزمونـه SF10P0 بـا ۸۸ ٪ و آزمونـه MK15 با ۸۷ ٪ بیشترین و آزمونه ZE10 با ٤١ ٪ کم‌ترین میزان درصد کاهش نفوذ یون کلر در عمـق مـشخص ۲۰ میلی‌متری را نسبت به آزمونه شـاهد داشـته‌انـد. هـم‌چنـین آزمونه MK15 به همراه SF10P0 با ۸٦ ٪ و آزمونه ZE10 با ٤۸ ٪ به ترتیب بیشترین و کم‌ترین میزان درصد کاهش ضریب انتشارپذیری را نسبت به آزمونه شـاهد در ناحیـه پاشش نشان داده‌اند. در همین راستا، آزمونه‌هـای MK15 با ۱/٤۸ ٪ و آزمونه‌های ZE10 و SF5 بـا مقـدار یکـسان ۰/۷۹٪ وزنی بتن به ترتیب بیشترین و کم‌تـرین مقـدار کلـر سطحی را در بین آزمونه‌های حاوی پوزولان دارا هستند.

با توجه به نتایج ارائه شده در حالت کلی، می‌تـوان استنباط نمود که در ناحیه‌ی پاشش و در بین آزمونه‌هـای بدون پوزولان و با نسبت آب به سیمان متفـاوت آزمونـه C1 بهتر عمـل کـرده اسـت. هـم‌چنـین مقایـسه‌ی نتـایج آزمونه‌های حاوی پوزولان های مختلف نشان می‌دهد که آزمونـــه‌هـــایMK15 و SF10P0 بهتـــرین عملکـــرد را داشته‌اند. از طرفی، آزمونـه‌هـای ZE10 ، MK5، SF5 در این ناحیه نسبت به دیگـر آزمونـه‌هـای حـاوی پـوزولان عملکرد ضعیف‌تری داشته‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان نفوذ یون کلـر در کلیه آزمونه‌های واقع در ناحیه پاشش به‌جز آزمونـه‌ی SF10P0 بیـشتر از ناحیـه‌ی جزرومـد مـی‌باشـد. دلیـل عملکرد متفاوت آزمونه SF10P0 را می‌توان ناشی از تاثیر متفـاوت شـرایط محیطـی دانـست. تقریبـاً در تمـامی آزمونه‌های حاوی پوزولان‌های مختلف با افزایش درصـد جایگزینی پوزولان تاثیر تغییر شـرایط رویـارویی کـم‌تـر می‌شود؛ به طوری که در هر سه پـوزولان میکروسـیلیس، متاکائولن و زئولیت کم‌ترین درصد افزایش نفوذ یون کلر آزمونه‌های ناحیه‌ی پاشش نسبت به ناحیه‌ی جزرومـد در بیشترین درصد جایگزینی هر پوزولان مشاهده می‌شود.

از جمع‌بندی نتایج ارائـه شـده در هـر دو ناحیـه‌ی جزرومد و پاشش می‌توان درصدهای بهینه‌ی هر پوزولان را در ناحیـه‌هـای جزرومـد و پاشـش معرفـی نمـود. آزمونه‌های SF10، MK10 وZE10 در ناحیه‌ی جزرومد و آزمونه‌هـای SF10، MK10 و ZE20 در ناحیـه‌ی پاشـش نسبت به دیگر آزمونه‌های حاوی پوزولان در پارامترهـای مورد بررسی، عملکرد مناسب‌تری داشته‌اند. هم‌چنـین در هر سه پارامتر مورد بررسی، نفوذ یـون کلـر در عمـق ۲۰ میلـی‌متـری، ضـریب انتـشارپذیری و کلـر سـطحی، آزمونه‌های حاوی پـوزولان عملکـرد بهتـری نـسبت بـه آزمونه شاهد نشان داده‌اند. با این حال آزمونـه MK10 در هر دو ناحیـه‌ی جزرومـد و پاشـش، بهتـرین عملکـرد را داشته است.

نکته‌ی قابل توجه این‌کـه بـا وجـود کـاهش قابـل ملاحظه مقدار نفوذ یون کلـر و ضـریب انتـشارپذیری در آزمونه‌های حاوی پوزولان نسبت به آزمونه شاهد، مقـدار کلر سطحی در این آزمونـه‌هـا نـسبت بـه آزمونـه شـاهد افـزایش محـسوسی داشـته اسـت. بـه ایـن ترتیـب در آزمونه‌هـای بـا طـرح‌هـای اخـتلاط متفـاوت در شـرایط قرارگیری یکسان، مقدار کلر سطحی زیادتر، نشان‌دهنده‌ی

مقاومت بیشتر بتن در اجازه‌ی انتشار یون کلر به داخل بتن می‌باشد. به نظر می‌رسد که افزایش مقدار کلر سطحی پدیده‌ای است که نشان دهنده‌ی کاهش مقدار نفوذ یون کلر و ضریب انتشارپذیری بتن می‌باشد.

نتیجه‌گیری

۱. استفاده از پوزولان در طرح اختلاط بتن، نقش مهمی در افزایش طول عمر مفید سازه‌های بتنی در شرایط محیطی مهاجم از جمله خلیج فارس دارد.

۲. عمل‌آوری کوتاه مدت (سه روز) منجر به نفوذ مقدار زیاد یون کلر در بتن می‌شود؛ بنابراین، تحت این شرایط حتی بتن‌های با نسبت آب به سیمان ۰/٤ و بدون پوزولان در نواحی جنوبی خلیج فارس برای مقابله با شرایط گزندبار کفایت نمی‌کنند.

۳. ضریب انتشارپذیری آزمونه بدون پوزولان در ناحیه‌ی جزرومد، بیشتر از ناحیه‌ی پاشش است. این در حالی است که با کاربرد پوزولان در طرح‌های اختلاط، ضریب انتشارپذیری آزمونه‌های حاوی پوزولان در ناحیه‌ی پاشش، بیشتر از ناحیه‌ی جزرومد می‌باشد.

٤. در نسبت آب به سیمان یکسان و در صورت استفاده از پوزولان، مقدار ضریب انتشارپذیری در آزمونه‌های حاوی پوزولان در مقایسه با آزمونه بدون پوزولان در هر دو ناحیه پاشش و جزرومد کاهش می‌یابد.

۵. مقدار کلر سطحی به ترتیب در نواحی پاشش، جزرومد کاهش می‌یابد.

Cs(جزر و مد) < Cs(پاشش)

٦. با وجود کاهش قابل ملاحظه، مقدار نفوذ یون کلر و ضریب انتشارپذیری در آزمونه‌های حاوی پوزولان نسبت به آزمونه شاهد، مقدار کلر سطحی در این آزمونه‌ها نسبت به آزمونه شاهد افزایش محسوسی داشته است. بنابراین، می‌توان استنباط نمود که افزایش مقدار کلر سطحی پدیده‌ای مثبت و در راستای کاهش مقدار نفوذ یون کلر و ضریب انتشارپذیری بتن می‌باشد و نشان می‌دهد نظر به این‌که پوزولان‌ها با اصلاح ریز ساختار بتن و کاهش ضریب انتشارپذیری برای ورود یون کلر مانع ایجاد می‌کنند و این کلر در سطح باقی می‌ماند.

۷. از جمع‌بندی نتایج ارائه شده می‌توان درصدهای بهینه‌ی هر پوزولان را در ناحیه‌های جزر و مد و پاشش معرفی نمود. در ناحیه‌ی جزرومد، هر سه طرح اختلاط حاوی میکروسیلیس، متاکائولن و زئولیت با ۱۰ ٪ جایگزینی و در ناحیه‌ی پاشش طرح حاوی میکروسیلیس و متاکائولن با ۱۰ ٪ جایگزینی و طرح حاوی زئولیت با ۲۰ ٪ جایگزنی نسبت به دیگر آزمونه‌های حاوی پوزولان در پارامترهای مورد بررسی عملکرد بهینه‌ای داشته‌اند. بدیهی است انتخاب نوع پوزولان در هر پروژه علاوه بر پارامترهای فنی به در دسترس بودن پوزولان و پارامترهای اقتصادی نیز بستگی دارد.

۸. در بررسی عملکرد پوزولان‌های مختلف، ترتیب اولویت عملکرد مطلوب به صورت متاکائولن، میکروسیلیس و زئولیت می‌باشد. با این حال، آزمونه MK10 در هر دو ناحیه ی جزر و مد و پاشش بهترین عملکرد را داشته است.

۹. استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن موجب عملکرد مناسب‌تر بتن در شرایط محیطی مهاجم شده است.

بدیهی است که نتایج ارائه شده در مدت زمان نه ماهه است و برای دستیابی به نتایج تکمیلی و قابل اطمینان‌تر نیاز به مطالعات دراز مدت می‌باشد. هم‌چنین مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که توجه به ملاحظات مقاومتی در طراحی، نمی‌تواند ضامن تأمین عمر مفید سازه‌ها باشد و به منظور تأمین عمر مفید یک سازه باید به مسائل پایایی نیز توجه نمود.

مراجع

1. Bonakdar, A., Bakhshi, M., Ghalibafian, M., "Properties of High-performance Concrete Containing High Reactivity Metakaolin", 7th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, Washington DC. USA, Vol. 1, pp 228-295, (2005).

۲. شکرچی‌زاده؛ محمد، میردامادی؛ علیرضا، بنکدار؛ ابوذر، بخشی؛ مهدی، "بهبود خواص بتن‌های توانمند با استفاده از متاکائولن"، مجله‌ی تحقیقات بتن، شماره‌ی۲، صفحات ۵۵-۶۳، (۱۳۸۷).

3. Boddy, A., Hooton, R., Gruber, K., "Long-term Testing of the Chloride-penetration Resistance of Concrete Containing High-reactivity Metakaolin", Cement and Concrete Research, 31 (5), pp 759–765, (2001).

4. Gruber, KA., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R., Thomas, M., "Increasing Concrete Dura- bility with High-reactivity Metakaolin", Cement and Concrete Research, 23 (6), pp 479–484, (2001).

5. Feng, N.Q., Hsia-ming, Y., Li-Hong, Z., "The Strength Effect of Mineral Admixture on Cement Concrete", Cement and Concrete Research, Volume 18, Issue 3, pp 464-472 , (1988).

6. Feng, N.Q., Li, G.Z., Zang, X.W., "High-Strength and Flowing Concrete Zeolitic Mineral Admixtures", Cement, Concrete and Aggregates, Volume 12, Issue 2, pp 61-69, (1990).

7. Liguori, B., Caputo, D., Marroccoli, M., Colella, C., "Evaluation of Zeolite-bearing Tuffs as Pozzolanic Addition for Blended Cements", *Eighth CANMET/ACI International conference on fly Ash*, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete, (2004).

8. Perraki, T., Kakali, G., Kontoleon, F., "The Effect of Natural Zeolites on the Early Hydration of Portland Cement", Microporous and Mesoporous Materials, Volume 61, Issues 1-3, pp 205-212, 18, (2003).

9. Poon, C. S., Lam, L., Kou, S.C., Lin, Z.S., "A Study on the Hydration Rate of Natural Zeolite Blended Cement Pastes", Construction and Building Materials, Volume 13, Issue 8, pp 427-432, (1999).

10. Chan, S.Y.N., Ji, X., "Comparative Study of the Initial Surface Absorption and Chloride Diffusion of High Performance Zeolite, Silica Fume and PFA Concretes", Cement and Concrete Composites, Volume 21, Issue 4, pp 293-300, (1999).

11. Tatematsu, H., Nakamura, T., Koshimizu, H., "Zeolites", Abstract, (1996).

12. Ahmadi, B., Shekarchi, M., "Use of Natural Zeolite as a Supplementary Cementitious Material", Cement and Concrete Composites, Volume 32, Issue 2, pp 134-141, (2010).

13. ACI 224, "Protection of metals in concrete against corrosion", (2001).

14. Shekarchi, M., Rafiee, A., Layssi, H., "Long-term Chloride Diffusion in Silica Fume Concrete in Harsh Marine Climates", Cement & concrete composite, Volume 31, Issue 10, pp 769-775, (2009).

15. Ghods, P., Chini, M., Alizadeh, A., Hoseini, M., Shekarchi, M., Ramezanianpour, A.A., "The Effect of Different Exposure Conditions on the Chloride Diffusion into Concrete in the Persian Gulf Region", 3th ConMat'05, Vancouver, Canada, 10 pages, (2007).

16. ASTM G109, "Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments", (2003).

17. ASTM C114-00, "Standard Test Method for Chemical Analysis of Hydraulic Cement", Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.01.

۱۸. رفیعی؛ علیرضا. "بررسی اثر زمان بر آهنگ نفوذ یون کلر در بتن در محیط خلیج فارس با رویکرد احتمال اندیشانه"، پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشکده‌ی فنی دانشگاه تهران، (۱۳۸٦).

19. Shekarchi, M., Moradi-Marani, F., Pargar, F., "Corrosion Damage of a Reinforced Concrete Jetty Structure in the Persian Gulf: a Case Study, Structure and Infrastructure Engineering, p .1-13, (2009).

20. Pargar, F., Layssi, H., Shekarchi, M., "Investigation of Chloride Threshold Value in an Old Concrete Structure. *Fifth International Conference on Concrete under Severe Conditions, Environment and Loading, CONSEC’07 conference*, France, June 4-6, (2007).